Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 2, June. July. 2017, p. 333- 345

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۳، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۳۹۶ ص.۳۴۵-۳۳۳

پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت سطحی و کینتیک‌های انتقال جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

صفیه خلیلیان[۱]- امان محمد ضیائی‌فر[۲*]- علی اصغری[۳]- مهدی کاشانی‌نژاد[۴] - محبت محبی[۵]

تاریخ دریافت:۱۳۹۴/۰۶/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

چکیده

انتقال رطوبت و روغن بر توزیع دما در سیستم نقش داشته و باعث ایجاد شار حرارتی متغیر در فرایند می‌گردد. لذا در این پژوهش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به بررسی و پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت سطحی و کینتیک‌های انتقال جرم (رطوبت و روغن) طی فرایند سرخ کردن نمونه‌های بادمجان پرداخته شد. اثر پیش تیمار خشک کردن با هوای داغ در چهار سطح دمایی (۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) تا رسیدن به سطوح رطوبتی ۱۲ و ۵ گرم بر گرم ماده خشک، دماهای مختلف سرخ کردن (۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) طی مدت زمان ۶ دقیقه در فواصل زمانی یک دقیقه‌ای بر محتوی روغن و رطوبت برش‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق با سه بار تکرار مورد بررسی قرار گرفت. پروفیل‌های دمایی در سطوح بالا و پایین نمونه‌ها طی فرایند سرخ کردن عمیق با قرار دادن ترموکوپل نوع K نیز ثبت گردید. ارتباط بین ضریب انتقال حرارت سطحی وکینتیک‌های انتقال جرم نمونه‌های بادمجان، طی فرایند سرخ کردن عمیق با استفاده از تحلیل مولفه اصلی (PCA) نشان داد که داده‌های موجود در ۳ ناحیه مختصاتی PC، متفاوت قرار داشتند. نتایج حاصل از بررسی ضرایب انتقال حرارت سطحی و کینتیک‌های انتقال جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار با ساختار پرسپترون چند لایه (MLP)، حاکی از وجود یک رابطه پیچیده بین پارامترهای انتقال حرارت سطحی و جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق بود. شبکه مورد استفاده شامل تابع سیگموئید در لایه مخفی و الگوریتم آموزش لونبرگ-مارکوارت (ML) با توپولوژی سه لایه ۴-۵-۴ با ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۷ و متوسط مربع خطای (MSE) ۰/۰۰۱۳، بهترین شبکه برای پیش‌بینی کینتیک‌های انتقال رطوبت، روغن و ضریب انتقال حرارت سطحی به دست آمد. با توجه به نتایج فوق می‌توان بیان نمود که این شبکه امکان دست‌یابی به دما و زمان سرخ کردن با کمترین مقادیر رطوبت و روغن در نمونه‌های بادمجان سرخ شده را در کمترین زمان ممکن فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سرخ کردن، بادمجان، ضریب انتقال حرارت سطحی، انتقال جرم، شبکه عصبی مصنوعی.

مقدمه

شناخت ویژگی‌های حرارتی مواد غذایی حین فرایند سرخ کردن و مکانیسم‌های دخیل در انتقال جرم (رطوبت و روغن) می‌تواند کمک شایانی در کنترل کیفیت محصول سرخ شده باشد (Fiszman *et al*., 2005).

در اکثر مقالات سرخ کردن، محققان به اصل وجود هم‌زمان انتقال حرارت و جرم اشاره کرده‌اند و آن را یکی از عوامل دشوارکننده مطالعه این فرایند و مکانیسم‌های دخیل در پدیده‌های انتقال حرارت و جرم معرفی نموده‌اند (Farkas *et al*., 1996; Vitrac *et al*., 2002; Baumann & Escher, 1995; Ahromrit, A., & Nema, 2010; Datta, 2007; Farid & Chen, 1998). در طی فرایند سرخ کردن حرارت از روغن به طریق جابجایی به سطح نمونه منتقل شده که باعث افزایش دمای ماده گردیده و تقریبا با رسیدن دما به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، آب درون نمونه به صورت بخار از سطح ماده شروع به خارج شدن می‌کند و سطح نمونه را به‌صورت لایه‌های از حباب‌هایی با توزیع و اندازه‌های مختلف می‌پوشاند (Saguy *et al*., 1998). مرحله رشد، تحرک حباب‌های بخار و جدایش پیوسته آن‌ها از سطح نمونه به شکل پیچیده‌ای به شیب حرارتی روغن و نمونه،

۱، ۲ و ۴- دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۵- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(* - نویسنده مسئول: Email: ziaiifar@gmail.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v1395i0.49966

ماهیت سطح، خواص ترموفیزیکی سیال نظیر کشش سطحی مربوط می‌شود. از طرفی تشکیل حباب بخار بر ریز جریان‌های روغن نزدیک سطح نمونه موثر بوده و در نهایت یکی از عوامل مهم بر تعیین ضریب انتقال حرارت سطحی می‌باشد (Sahin *et al.*, 1999). با توجه به نوع جریان روغن اطراف نمونه در اثر خروج حباب‌های بخار، لایه‌های مرزی گرمایی هم در روغن و هم در بافت نمونه ایجاد می‌گردد. به عبارتی در هر ناحیه از روغن و نمونه که شیب دما وجود داشته باشد در آن ناحیه لایه مرزی گرمایی ایجاد خواهد شد (Farinu & Baik, 2008). افزون بر این، خروج آب و بخار درون نمونه و نحوه ایجاد هسته‌های جوشش خود باعث ایجاد تغییرات ساختاری در بافت نمونه غذایی می‌گردد و به محض کاهش آب درون بافت، سطح ماده غذایی دچار تغییرات گسترده ساختاری شده که لایه‌ای با عنوان پوسته ایجاد می‌گردد (Farkas *et al.*, 2000). بنابراین، آگاهی از رابطه بین شرایط در لایه‌های مرزی و ضریب انتقال حرارت سطحی در هر فاصله روغن از سطح نمونه و هر فاصله از درون نمونه تا سطح نمونه می‌تواند در تعیین رفتارهای حرارتی و کینتیک‌های انتقال رطوبت، روغن و کنترل فرایند جایگاه ارزشمندی داشته باشند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی[1] (ANN) ابزارهایی مهم در میان مباحث هوش محاسباتی[2] به حساب می‌آیند. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی مصنوعی معرفی شده‌اند، که عمدتا در کاربردهایی همچون طبقه‌بندی، خوشه‌بندی، تشخیص الگو، مدل‌سازی، تقریب توابع، کنترل، تخمین و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rumelhart *et al.*, 1986). مدل‌های شبکه عصبی بر خلاف مدل‌های ریاضی، بدون نیاز به استخراج رابطه بین پارامترها، قادر به شناسایی رابطه بین آن‌ها می‌باشد و از این نظر ابزار بسیار قدرتمندی در مدل‌سازی محسوب می‌گردند. در این روش، رابطه بین پارامترها در مرحله آموزش به شبکه معرفی می‌گردد و در مرحله بعد، شبیه مغز انسان عمل کرده و در صورت انجام یک آموزش مناسب، شبکه عصبی قادر خواهد بود پیش بینی فرایند را انجام دهد و مشکلات مربوط به استخراج رابطه بین پارامترها از بین می‌رود. بنابراین، مدل‌های شبکه عصبی معمولا در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرند که رابطه بین پارامترها ناشناخته یا بسیار پیچیده است (Sreekanth *et al.*, 1999; Sablani, 2001) متداول‌ترین شبکه‌های عصبی، نوع پرسپترون چند لایه[3] (MLP) پس انتشار خطا[4] (BP) می‌باشد و از سه نوع لایه (لایه ورودی، لایه مخفی یا میانی و لایه خروجی) تشکیل می‌شوند (Hernandez *et al.*, 2003).

بادمجان با نام علمی *Solanum Melongena* از تیره سیب زمینیان بوده که بومی کشور هندوستان می‌باشد. بادمجان به‌لحاظ اقتصادی یک محصول مهم کشاورزی در آسیا و اروپا محسوب می‌شود (Van Eck & Snyder, 2006). طبق آمار منتشره سازمان خوار و بار و کشاورزی (FAO, 2011) ایران بعد از چین و هندوستان با تولید ۱/۲ میلیون تن در سال، مقام سوم تولید بادمجان در جهان را دارد. میزان ترکیبات اصلی بادمجان با استناد بر پایگاه اطلاعاتی مواد غذایی آمریکا در هر ۱۰۰ گرم به‌طور متوسط به‌صورت ذیل می‌باشد: آب ۸۶/۱۳، کربوهیدرات ۹/۴۱، فیبر ۳، پروتئین ۰/۹۸، چربی ۰/۱۸، ویتامین‌ها و موادمعدنی ۰/۳ گرم. بادمجان به دلیل جذب روغن فراوان حین فرایند سرخ کردن علی‌رغم طعم و محبوبیت زیاد در بین مصرف‌کنندگان، استفاده از آن را به گزینه‌ای تامل برانگیز، تبدیل کرده است. بنابراین استفاده از روش‌های مناسب برای سرخ کردن و کاهش محتوی روغن آن ضروری به نظر می‌رسد.

بررسی منابع بیانگر آن است که تاکنون پژوهش‌های اندکی جهت فرآوری و یا افزایش مدت ماندگاری بادمجان صورت‌گرفته است. همچنین تحقیقات بسیار اندکی در خصوص رفتار جذب روغن بادمجان طی فرایند سرخ کردن و تاثیر ضرایب انتقال حرارت سطحی صورت پذیرفته است. از این رو بررسی ویژگی‌های حرارتی و کینتیک‌های انتقال جرم طی فرایند سرخ کردن عمیق بادمجان و مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند گام موثری بر بهبود، بهینه‌سازی و پیش‌بینی شرایط فرایند سرخ کردن بادمجان باشد.

مواد و روش‌ها

بادمجان واریته بلک بل[5] از بازار محلی واقع در شهرستان گرگان، روغن آفتابگردان (لادن، ایران)، پترولیوم اتر از شرکت مرک[6] آلمان خریداری شد.

آماده‌سازی برش‌های بادمجان

نمونه‌های بادمجان در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا شروع انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. به‌منظور یکسان بودن قطر برش‌ها با استفاده از قالب دستی به قطر ۲/۵ و ضخامت ۱ سانتی‌متر با دقت زیاد، تهیه شد و در نهایت نمونه‌های با وزن یکسان جهت انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

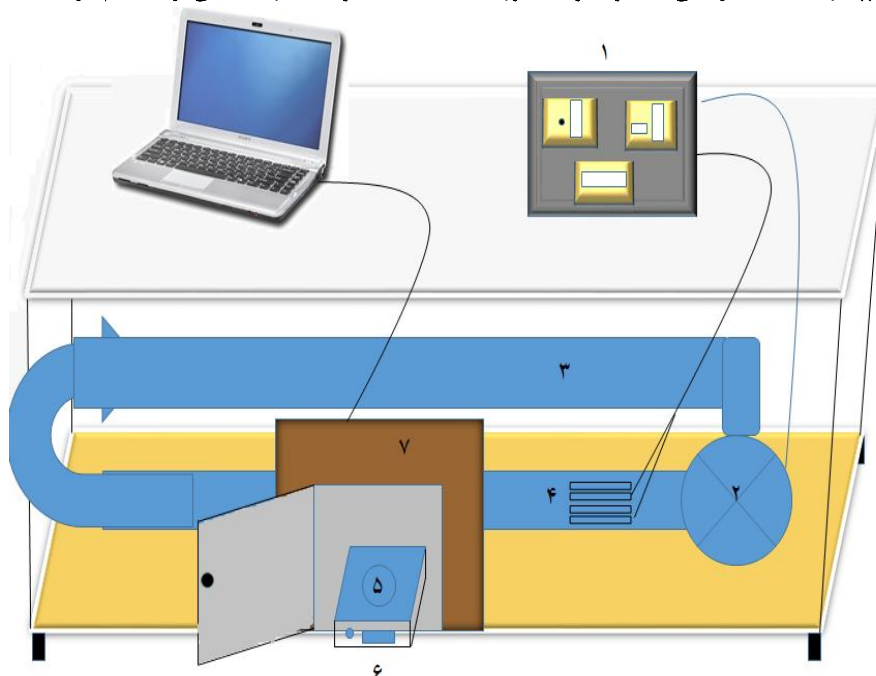
کاهش محتوی رطوبت نمونه‌های بادمجان با استفاده از هوای داغ

مرحله پیش خشک کردن نمونه‌های بادمجان با استفاده از خشک‌کن هوای داغ در آزمایشگاه گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه

1 Artificial Neural Networks
2 Computational Intelligence
3 MultiLayer Perceptron
4 Back Propagation Error

5 Black Bell
6 Merk

کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، انجام شد (شکل ۱). دمـای هـوای درون خشک‌کن توسط چهـار المنـت الکتریکـی ۵۰۰ وات و سنسـور دمایی نوع K کنترل شد. سرعت جریان هوا ۱/۵ m/s در دماهای ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید.



شکل ۱- خشک‌کن هوای داغ (۱- سیستم کنترل‌کننده سرعت فن و دمای سنسورهای حرارتی، ۲- فن، ۳- مسیر حرکت هوای داغ، ٤- سنسورهای حرارتی، ۵- محل قرارگیری نمونه، ٦- ترازو، ۷- محفظه خشک کردن نمونه).

فرایند سرخ کردن

فرایند سرخ کردن در سـرخ‌کـن خـانگی (Model BDZ-5A-1) مجهز به کنترل‌کننده دما، دارای ترموکوپل نوع K، انجام شد. قبل از فرایند سرخ کردن ابتدا ۱/۵ لیتر روغن درداخل سرخ‌کن ریختـه و بـه مدت یک ساعت گرم شد. سپس نمونـه‌هـای آمـاده شـده در دمـای ۱۸۰درجه سانتی‌گراد به مدت زمـان هـای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ دقیقـه سرخ شدند. در پایان هر یک از این زمان‌ها، نمونه‌ها بلافاصله از داخل روغن خارج شده وروی توری سیمی به مدت ۵ دقیقه به‌منظور سـرد شدن، قرار گرفت و محتوی رطوبت و روغن آنها ارزیابی شد.

رطوبت

اندازه‌گیری میزان رطوبت نمونه‌های سرخ شده مطـابق بـا روش استاندارد (AOAC. 1995) ، با خشک کردن نمونـه‌هـا در آون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن بـه وزن ثابـت انجـام گرفت. نمونه‌ها پس از خروج از آون، داخل دسـیکاتور سـرد شـدند و میزان رطوبت بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید.

روغن

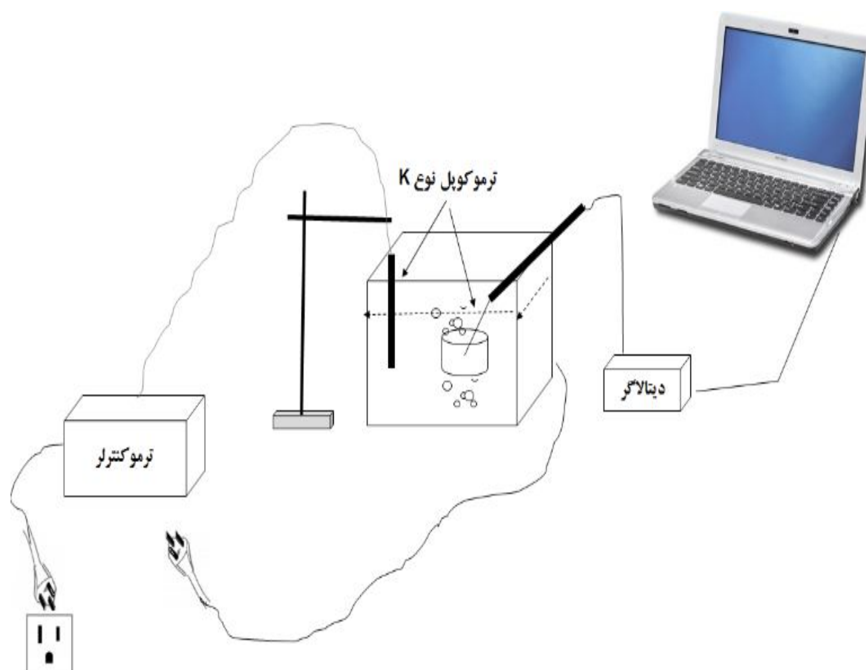
کارتوش‌های حاوی نمونه‌های خشک شـده بـرای انـدازه‌گیـری محتوی روغن به روش سوکسـله (AOAC. 1995) اسـتفاده شـدند. ابتدا نمونه‌های خشک شده درون کارتوش خرد شدند و سپس توسـط حلال پترولیوم اتر با نقطه جوش ۴۰ درجه سانتی‌گراد، استخراج روغن نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت انجام گرفت و در نهایت میزان روغـن بـر مبنای وزن خشک محاسبه شد.

پروفیل دمایی سطح نمونه‌ها

به‌منظور مطالعه پروفیل‌های دمایی سطح نمونـه‌هـای بادمجـان حین فرایند سرخ کردن، ترموکوپل نوع K، به‌طور مسـتقیم در ناحیـه سطحی نمونه قرار داده شد، به‌طوری کـه نـوک ترموکوپـل از بافـت خارج نگردد و تغییرات دمای مرکز محصول در مـدت ۳۶۰ ثانیـه بـا فاصله زمانی ۱ ثانیه بـه وسـیله دیتـالاگر[1] (Model TC-08 "RS-232" Pico technology) و نرم‌افزار پیکـولاگ[2] در کـامپیوتر ثبـت

1 Data logger
2 PicoLog software

گردید (شکل ۲).



شکل ۲- شماتیک سامانه ثبت پروفیل‌های دمایی نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق.

ضریب انتقال حرارت سطحی

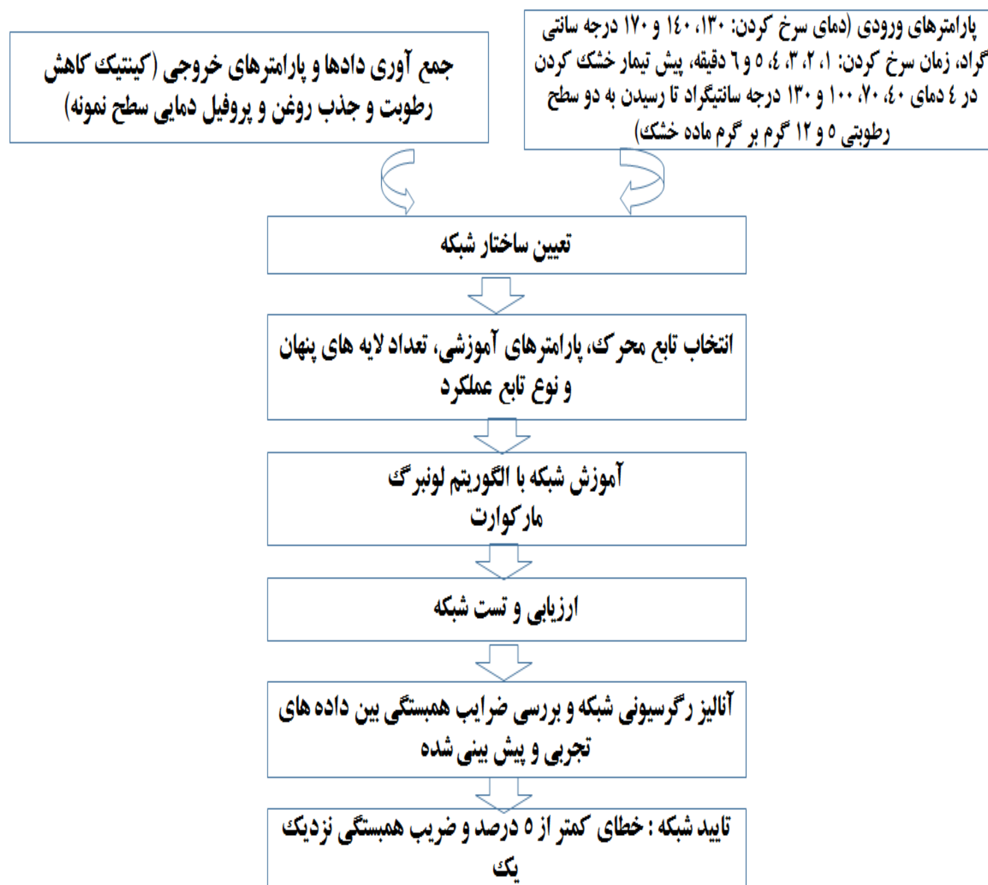
ضریب انتقال حرارت سطحی در این پژوهش از تبادل انرژی گرمایی بین نمونه و روغن محاسبه گردید (Farinu & Baik). بدین ترتیب که مجموع حرارتی که از طریق جابجایی به‌واسطه روغن به بادمجان منتقل می‌شود برابر با مجموع انرژی صرف شده برای تغییر دمای بادمجان و انرژی مصرف شده برای تبخیر آب درون بادمجان می‌باشد (معادله۱):

$$hA(T_\infty - T_s) = MC_P \frac{dT}{dt} + L_v \frac{dW}{dt} \quad (۱)$$

A: مساحت سطح مقطع نمونه‌های بادمجان، T_∞ : دمای روغن، T_s: دمای نمونه در هر لحظه، M: جرم نمونه، C_P : ظرفیت حرارتی ویژه بادمجان (علی و همکاران، ۲۰۰۲)، $\frac{dT}{dt}$: اختلاف دمای اولیه نمونه‌های بادمجان و دما در هر لحظه از فرایند، L_v : گرمای نهان تبخیر آب (۲۲۵۶ kJ/kg)، $\frac{dW}{dt}$: میزان آب تبخیر شده در هر لحظه از فرایند سرخ کردن.

شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی چندلایه پیش خور در زمینه‌های متنوعی از قبیل طبقه بندی الگوها، پردازش تصاویر، تقریب توابع و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا، یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌ها جهت آموزش شبکه‌های عصبی چندلایه پیش خور می‌باشد. عمومیت یافتن الگوریتم BP، بخاطر سادگی و کاربردهای موفقیت آمیزش در حل مسائل فنی- مهندسی می‌باشد. از قانون یادگیری پس انتشار خطا (BP)، برای آموزش شبکه‌های عصبی چندلایه پیش خور که عموماً شبکه‌های چند لایه پرسپترون (MLP) هم نامیده می‌شود، استفاده می‌شود، به‌کار می‌رود. به عبارتی توپولوژی شبکه‌های MLP، با قانون یادگیری پس انتشار خطا تکمیل می شود. به‌منظور پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت سطحی و کینتیک‌های انتقال جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. بنابراین از چهار ورودی شامل دما (۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ دقیقه) سرخ کردن، چهار دمای پیش تیمار خشک کردن با هوای داغ (۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) تا رسیدن به دو سطح رطوبتی (۵ و ۱۲ گرم بر گرم ماده خشک) استفاده شد که پارامترهای خروجی شامل محتوی رطوبت، روغن، ضریب انتقال حرارت سطح بالا و پایین نمونه‌های بادمجان با دو تکرار بودند که در مجموع ۲۸۸ داده جهت تشکیل ساختار شبکه استفاده گردید. در شکل ۳، فلوچارت مراحل تعیین بهترین ساختار شبکه عصبی نشان داده شده است.



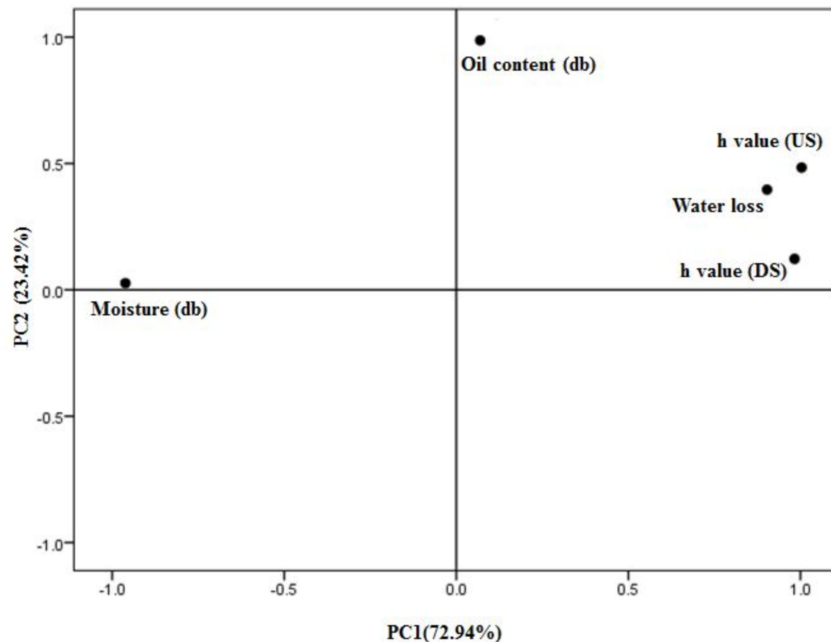
شکل ۳- شماتیک مراحل انتخاب و تعیین ساختار شبکه مناسب جهت مدل‌سازی کینتیک خروج رطوبت و جذب روغن و تخمین ضریب انتقال حرارت سطحی.

نتایج و بحث

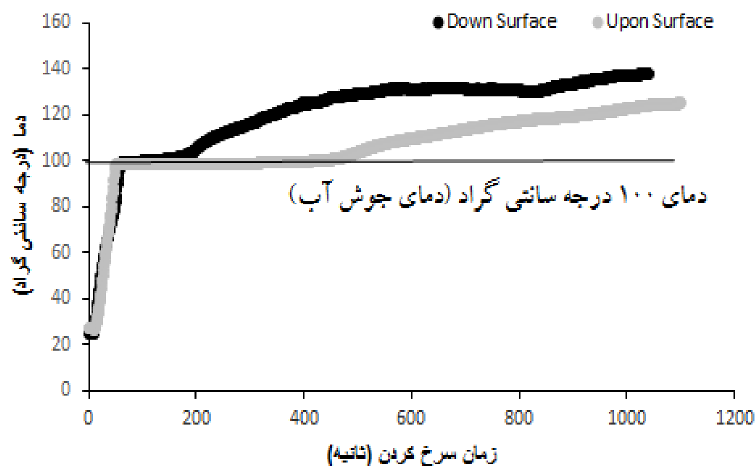
تحلیل مولفه اصلی

به‌منظور بررسی ارتباط بین ضرایب انتقال حرارت سطحی (سطح بالا و سطح پایین نمونه‌ها) با خروج رطوبت و جذب روغن از روش گرافیکی تحلیل مولفه اصلی استفاده شد. این روش اولین بار در سال ۱۹۰۱، توسط Pearson معرفی شد و هتلینگ (۱۹۳۳) ، آن را به‌عنوان یک روش آماری قدرتمند جهت کاهش ابعاد داده‌های تجربی استفاده نمود. در روش تحلیل مولفه اصلی، داده‌ها از حالت خطی به یک سیستم مختصات متعامد تبدیل شده که ارتباطات بین متغیرهای مد نظر در مجموعه داده‌های چند بعدی را به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴، مشاهده می‌گردد ضرایب انتقال حرارت سطح بالا و پایین نمونه‌های بادمجان با میزان کاهش وزن که همان میزان آب تبخیری از نمونه‌ها طی فرایند سرخ شدن می‌باشد، در ناحیه مختصاتی مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند که طبق انتظار با افزایش ضرایب انتقال حرارت سطحی، انرژی حرارتی از روغن به سطح نمونه‌ها منتقل شده و جریان حرارتی به درون نمونه شکل می‌گیرد که این انرژی حرارتی با تامین گرمای نهان تبخیر آب، باعث حرکت آب به سطح نمونه شده و به صورت حباب‌های بخار، نمونه را ترک کرده و وارد روغن می‌شود. در طی فرایند سرخ کردن با گذشت زمان، در نتیجه تبخیر آب نمونه‌های بادمجان، محتوی رطوبت نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این نتیجه نیز در شکل ۴، قابل مشاهده است. ضرایب انتقال حرارت و میزان آب خروجی با محتوی رطوبت نمونه‌ها در دو ناحیه مختصاتی مخالف در فضای PC قرار گرفته اند که این حاکی از وجود یک رابطه معکوس بین این دو دسته از پارامترهای انتقال حرارت و جرم می‌باشد. در رابطه با تاثیر ضرایب انتقال حرارت سطحی و محتوی روغن، طبق آن چه در شکل۴، مشاهده می‌گردد می‌توان این گونه بیان نمود که با افزایش ضرایب انتقال حرارت و خروج آب از نمونه‌ها طی فرایند سرخ کردن عمیق، محتوی روغن نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد که در مقایسه با تاثیر نرخ انتقال حرارت

سطوح بالا و پایین نمونه‌ها، ضریب انتقال حرارت سطح بالایی نمونه-ها، نقش مهمتری در افزایش محتوی روغن نمونه‌های بادمجان حین فرایند سرخ شدن دارد. طبق گزارش فارکاس و هابارد (۲۰۰۰) همزمان با افزایش ضریب انتقال حرارت سطحی، یک لایه خشک و پوسته مانند در سطح نمونه تشکیل می‌شود که به صورت مانعی باعث کاهش سرعت نفوذ و جذب روغن به درون نمونه می‌گردد. از آن جایی که انتقال حرارت از سطح پایینی نمونه‌های بادمجان سریع‌تر رخ می‌دهد (شکل ۵) بنابراین مسیر حرکت و جذب روغن درون نمونه، بیشتر از سطح بالایی که هنوز حفرات سطحی باز بوده و مسیر خروج آب هستند، صورت می‌گیرد.



شکل ٤- پراکنش ضرایب انتقال حرارت سطحی (US: Upon Surface و DS: Down Surface)، کاهش وزن، محتوی رطوبت و روغن نمونه‌های بادمجان سرخ شده طی فرایند سرخ کردن عمیق در فضای PC.



شکل ۵- تغییرات دمای سطوح بالا و پایین نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ شدن عمیق.

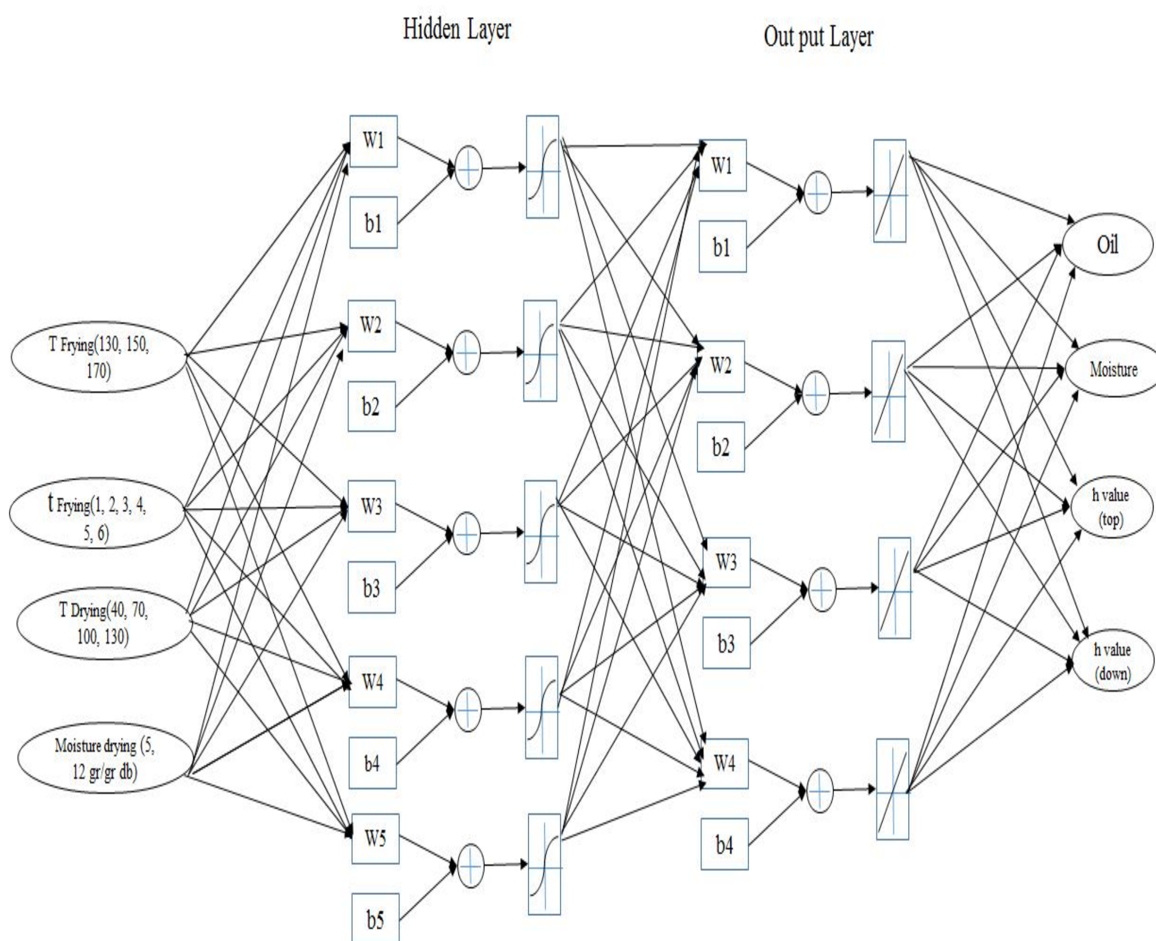
شبکه عصبی و فرایند مدل‌سازی

ساختار شبکه عصبی مصنوعی جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی محتوی روغن، رطوبت و ضرایب انتقال حرارت سطحی در شکل ۶ به‌صورت شماتیک آورده شده است. به‌منظور تعیین بهترین شبکه و توپولوژی مناسب از روش سعی و خطا استفاده شد به‌طوری که تابع سیگموئید در لایه مخفی و الگوریتم آموزش لونبرگ-مارکوارت (ML) با توپولوژی سه لایه ۴-۵-۴ با ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۷ و متوسط مربع خطای (MSE) ۰/۰۰۱۳، بهترین شبکه برای پیش بینی کینتیک‌های انتقال رطوبت، روغن و ضریب انتقال حرارت سطحی به‌دست آمد.

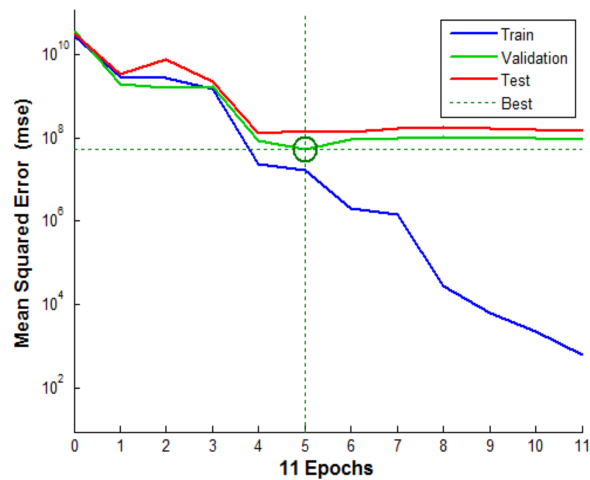
منحنی آموزش جهت تعیین میزان دقت مدل، داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده به‌سیله شبکه MLP درسه مرحله آموزش، ارزیابی و آزمایش مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌گردد کارایی شبکه در پیش بینی داده‌های تجربی مناسب و قابل قبول می‌باشد.

افزون براین می‌توان معادله رگرسیونی مربوط به ضریب تبیین بین داده‌های تجربی و پیش بینی شده پاسخ‌های مورد بررسی (محتوی روغن، رطوبت و ضرایب انتقال حرارت سطحی) را نیز در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، ملاحظه نمود.

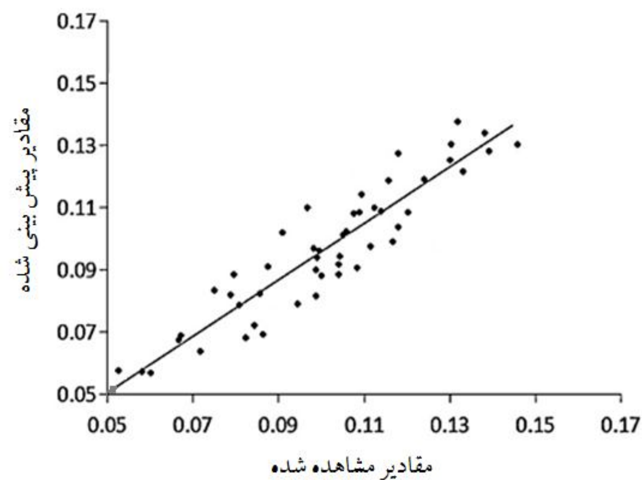
روند تغییرات محتوی روغن، رطوبت و ضرایب انتقال حرارت سطحی در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده تا حد قابل قبولی قادر به توصیف روند و رفتار تغییرات محتوی روغن، رطوبت و ضرایب انتقال حرارت سطحی در طی زمان سرخ کردن عمیق بوده است.



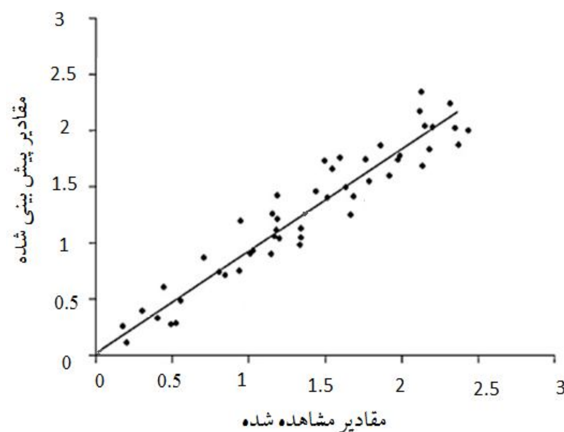
شکل ٦- ساختار شبکه پس انتشار با ساختار پرسپترون چند لایه (MLP) و تابع سیگموئید در لایه مخفی.



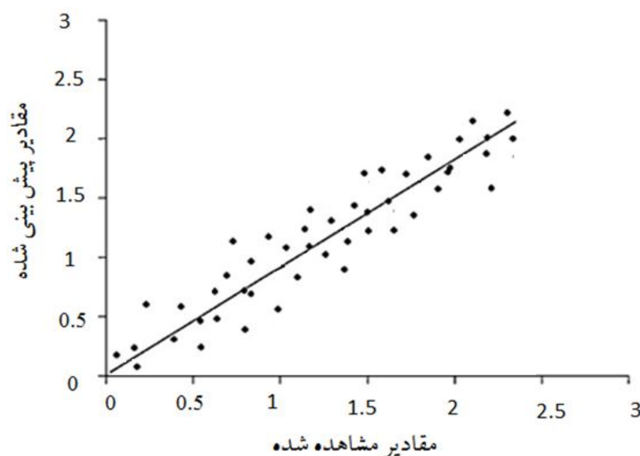
شکل ۷- منحنی آموزش شبکه MLP با یک لایه پنهان و ۵ نورون.



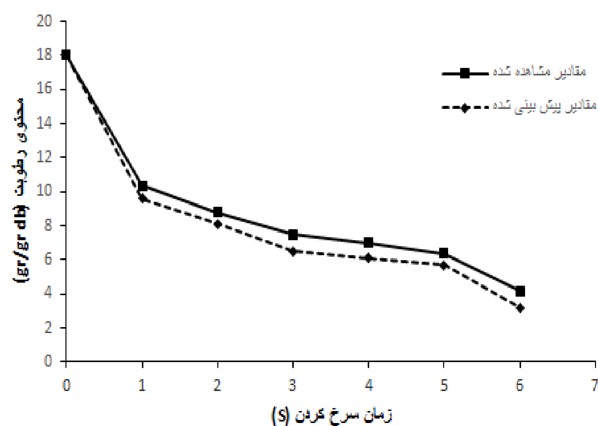
شکل ۸- نمودار معادله رگرسیونی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده محتوی روغن نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق.



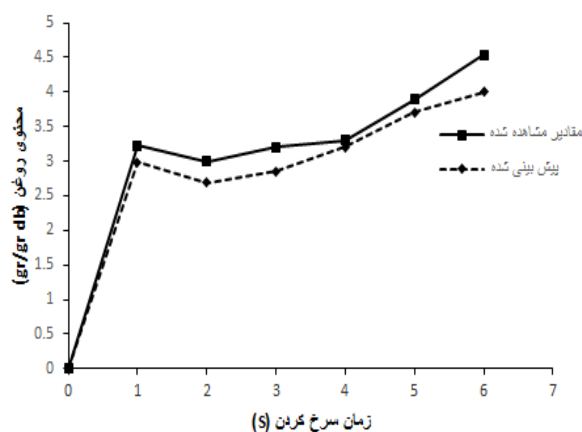
شکل ۹- نمودار معادله رگرسیونی بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده محتوی رطوبت نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق.



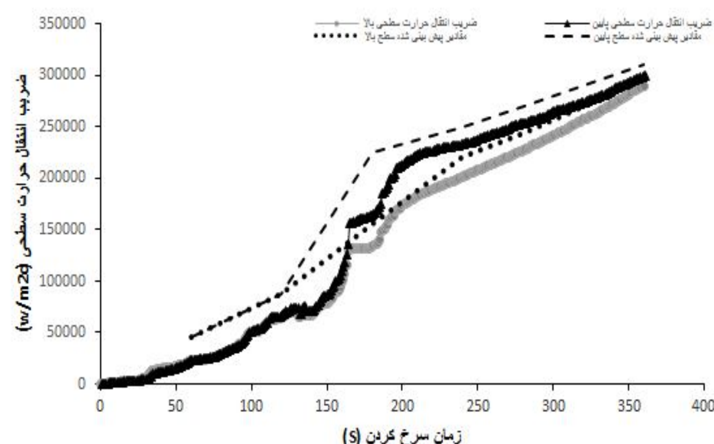
شکل ۱۰- نمودار معادله رگرسیونی بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده ضرایب انتقال حرارت سطحی نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق.



شکل ۱۱- نمودار مقادیر میانگین رطوبت مشاهده شده و پیش‌بینی شده نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق در دمای °C ۱۸۰.



شکل ۱۲- نمودار مقادیر میانگین روغن مشاهده شده و پیش بینی شده نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق در دمای °C ۱۸۰.



شکل ۱۳- نمودار مقادیر میانگین ضرایب انتقال حرارت مشاهده شده و پیش‌بینی شده نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق در دمای ۱۸۰ °C.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن بود که بین ضرایب انتقال حرارت سطحی و تغییرات محتوی رطوبت و روغن نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق روابط عمیق و تامل برانگیزی وجود دارد و علاوه بر این، مقادیر ضریب انتقال حرارت سطحی در ناحیه سطح بالایی نمونه در مقایسه با ضریب انتقال حرارت سطحی سطح زیرین نمونه‌ها، نشان داد که جذب روغن از این ناحیه بیشتر صورت می‌گیرد. این پدیده را می‌توان به خروج بیشتر و طولانی مدت‌تر حباب‌های بخار آب از سطح بالایی نمونه نسبت داد که این خود باعث تشکیل آهسته‌تر و دیرتر پوسته در سمت بالایی نمونه خواهد شد و در نهایت کانال‌ها و حفرات سطح بالایی بیشتر در معرض نفوذ روغن خواهند بود. همچنین نتایج حاصل از پیش بینی پارامترهای انتقال حرارت و جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق، توسط شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه به عنوان یک روش غیرخطی، همبستگی نزدیکی با داده‌های تجربی نشان داد که این حاکی از عملکرد مناسب این روش برای مدل‌سازی و بررسی روابط بین پدیده‌های انتقال حرارت و جرم نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق می‌تواند باشد.

منابع

AOAC., 1995, Official methods of analysis. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

Ahromrit, A., & Nema, P. K., 2010, Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 632-637.

Baumann, B. & Escher, E., 1995, Mass and heat transfer during deep fat frying of potato slices. Rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 28, 395–403.

Chen, S. D., Chen, H. H., Chao, Y.C. & Lin, R. S. 2009. Effect of batter formula on qualities of deep-fat and microwave fried fish nuggets. *Journal of Food Engineering*. 95, 359–364.

Datta, A. K., 2007, Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80, 80-95.

FAO, 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Farid, M. M. & Chen X. D., 1998, The analysis of heat and mass transfer during frying of food using a moving boundary solution procedure. *Heat and Mass Transfer*, 34, 69-77.

Farinu, A. & Baik, O.-D., 2008, Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 89,187-194.

Farkas, B. E., Singh R. P. & Rumsey T. R., 1996, Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.

Farkas, B.E. & Hubbard, L.J., 2000, Analysis of convective heat and mass transfer during immersion frying, *Drying Technology*, 18, 1269-1285.

Fiszman, S. M., Salvador, A., & Sanz, T., 2005, Why, when and how hydrocolloids are employed in batter-coated food - A review. *Progress in Food Biopolymer Research*, 1, 55–68.

Hernandez. J. A. Perez, Garcia, M.A. Alvarado, Trystran, G. & Heyd, B., 2004, Neural networks for the heat transfer prediction during drying of cassava and mango. *Journal of Innovative Food Science and Emerging Technologies*,5, 57-64.

Ngadi, M. , Dirani, K. , & Oluka, S., 2006, Mass transfer characteristics of chicken nuggets. *International Journal of Food Engineering*, 2, 1–16.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & Williams, R. J., 1986, Learning internal representations by error propogation. Parallel data Processing,1, 318-362.

Sreekanth, S., Ramaswamy, H. S., Sablani, S. S., & Prasher, S. O.,1999, A neural network approach for evaluation of surface heat transfer coefficient,*J. Food Process*. Preserv. 23, 329-348.

Sablani, S. S.,2001, A neural network approach for non-iterative calculation of heat transfer coefficient in fluid-particle systems,*Chem. Eng. Process*., 40, 363–369.

Sahin, S., Sastry S.K. & Bayindirli L., 1999, The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.

Saguy, I. S. & Pinthus, I. J., 1995, Oil uptake during deep-fat frying: factors and mechanisms. *Food Technology*, 49,142–145, 152.

Van Eck, J. & Snyder, A., 2006, Eggplant (Solanummelongena L.). *Methods of Molecular Biology*, 343, 439-47.

Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L., 2002, Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53, 161-176.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 2, June. July. 2017, p. 333- 345





نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۳، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۳۹۶ ص.۳۴۵-۳۳۳

Prediction of surface heat transfer coefficients and mass transfer kinetics of eggplant samples during deep fat frying by artificial neural network

S. Khalilian[1], A. M. Ziaeifar[2*], A. Asghari[3], M. Kashaninejad[4], M. Mohebbi[5]

Received: 2015.09.18
Accepted: 2016.01.30

Introduction: Thermal properties of food during the frying process and mass transfer mechanisms (water and oil) can help in controlling the quality of the fried product (Fiszman et al., 2005). During the frying process, heat was transferred from the oil to the sample surface that it increases the temperature almost to 100 °C, the water evaporates and moved out. The sample surface was covered by bubble layers with various size and distribution. The formation of vapor bubbles on the samples surface have been effective on the micro-flows which is one of the important factor in the coefficient of heat transfer (Sahin et al., 1999). Therefore, knowledge of the relationship between the boundary layer and the surface heat transfer coefficient can determine the thermal behavior and kinetics of the migration of moisture and oil. Eggplant (Solanum Melongena L.) is one of the major agricultural crops of Asian and Mediterranean countries. Iran after China and India has achieved third place in eggplant production, which has made it remarkable, and economical. Eggplant absorbs high amounts of oil during the frying process due to its high moisture content (more than 90%) and high porous structure even if the residual water content is still quite high after frying.

Materials and methods: Fresh eggplants (*Solanum melongena L.* family Solanaceae) were obtained from the local market and stored at 4°C. Eggplant samples were washed with water tap and cut with manual mold into equal and similar cylindrical pieces (2.5×1cm). They were then washed with distilled water and surface water was removed using tissue paper. Finally, the samples were packed by poly-ethylene in order to prevent surface drying. A commercial sunflower oil was purchased from Ladan Factory, Iran.

Eggplant samples were dried at different temperature of hot air drying 40, 70, 100 and 130°C until moisture content 5 and 12 db%. Samples were drawn from the drier after drying, cooled at room temperature (25°C) and deep fat fried.

A domestic deep fat fryer with temperature control of ± 1°C (Seb, France) was used for carrying out frying operations. The fryer was filled with 2.5 l sunflower oil. The eggplant to oil ratio was kept at 1:50 w/v to reduce temperature variation in the oil bath. The frying was performed at 130, 150 and 170 °C for regular interval times 1, 2, 3, 4, 5 and 6 min. The frying oil was changed after 10 h of frying time. The samples were immediately removed from oil and were located on wired plate for draining and remove excess oil on the surface, and allowed to cool at room temperature before analyses. All experiments were performed in triplicates and the presented results are the mean of the obtained values.

Oil and moisture content were determined according to AOAC, 1995.

K type thermocouples (copper-nickel) with accuracy of ±1°C were used to measure the temperatures of samples. Temperature acquisition TC-08, Pico® (Technology Limited, England) with accuracy ±0.5°C and temperature controller PID Rex- D-100® (RKC) were used to data collection and oil temperature control, respectively.

In this study, convective heat transfer coefficient was calculated between surface sample and oil according to Farinu and Baik (2008).

In order to predict surface heat transfer coefficients and mass transfer kinetic eggplant samples during deep frying was used artificial neural networks. Then, the 4 inputs including: frying temperature (130, 150 and 170 °C), frying time (1, 2, 3, 4, 5 and 6 min), 4 pre-treatments drying temperature by hot air (40, 70, 100 and 130 °C) until the two moisture levels (5 and 12 %db) were used and output parameters including moisture and oil content, heat transfer coefficient with two replications which in total of 288 data were used to form the network

1, 2 And 4. PhD Student, Associate professor and Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources
3. Assistant professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources.
5. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
(*Corresponding Author Email: ziaiifar@gmail.com).

structure.

Results and discussion: Results of this study showed that there is some complicated relationship between convective heat transfer and moisture and oil content. In addition, the convective heat transfer coefficient in up and down surface of the sample showed that oil absorption will be from upper surface. This phenomenon can be attributed to upper surface due to more bubbles of vapor out of the sample. This leads would slower the formation of crust on the upper sample. Finally, channels and cavities of the upper level will be more susceptible to the contact of oil. The results of predictive parameters of heat and mass transfer during deep frying eggplant samples using artificial neural network multilayer perceptron as a non-linear method showed closely relationship with experimental data. It indicates that the proper functioning of this method for modeling and studying the relationship between heat and mass transfer phenomena during deep frying of eggplant samples.

Keywords: Frying, Eggplant, Surface Coefficient of Heat Transfer, Mass Transfer, Artificial Neural Network.